

Der Einfluss mineralogisch-petrographischer Verhältnisse auf die Druckabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von Gesteinen

H. STILLER-C. WAGNER-R. HEINRICH-D. FREUND

A hangsebesség nyomásfüggésének meghatározására szolgáló két nyomáskamrát írnak le a szerzők, az egyik 2 kbár, a másik 15 kbár nyomásig, továbbá egy ultrahang-berendezésről is említést tesznek. A mintegy 2000 at-ig nyert eredményeket többféle módon is bemutatják, hogy lehetővé tegyék nagyobb mennyiségű laboratóriumi görbének a mineralógiai és petrográfiai adatokkal való összehasonlítását.

Точное определение зависимости скорости звука от давления и температуры является важным условием при интерпретации сейсмических данных как для прикладной, так и для общей геофизики. В докладе описываются две камеры с максимальным давлением 2 и 15 кбар. Кривые зависимости скорости звука от давления представляются и нормируются в различных формах. Благодаря этому они могут сопоставляться, причем, если приписывать им количественные параметры, представляется возможность сопоставления их с петрографическими особенностями.

Zur Bestimmung der Druckabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit werden zwei Druckkammern für Drücke bis 2 kbar und bis 15 kbar sowie eine Ultraschalleinrichtung beschrieben. Die erhaltenen Ergebnisse von Druckversuchen bis 2000 at werden nach verschiedenen Arten dargestellt, um den Vergleich von grösseren Mengen von Kurven mit mineralogisch-petrographischen Ergebnissen zu ermöglichen.

Infolge der zunehmenden geophysikalischen Erkundung grösserer Tiefen folgt dringend die Notwendigkeit der Kenntnis gesteinsphysikalischer Parameter unter den Bedingungen grösserer Tiefen, d. h. unter hohem Druck und hohen Temperaturen. Da die seismische Methode bei der Tiefenerkundung bisher die genauesten Ergebnisse geliefert hat, steht somit die Ermittlung der mechanischen Parameter, insbesondere der Schallgeschwindigkeit, an erster Stelle.

Zu diesem Zweck wurden im Institut für Geodynamik Jena zwei Druckkammern entwickelt, in denen zunächst die Druckabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit sowohl für mässige Tiefen, d. h. 5-6 km Tiefe, als auch für etwas grössere Tiefen (bis 40 km Tiefe) bestimmt werden kann.

Aus früheren Untersuchungen, z. B. von Hughes u. a. (1951, 1956, 1957) oder Volarovic und Mitarbeitern (1962, 1966) hat es sich gezeigt, dass die Druckabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von zwei Ursachen abhängt: bei niederen Drücken (etwa 1000 at) vom Aufbau und dem Gefüge der Gesteine, bei höheren Drücken (> 10.000 at) dagegen hauptsächlich von den mechanischen Eigenschaften der gesteinsbildenden Minerale.

Die gerade für die Probleme der angewandten Geophysik wichtige Abhängigkeit von Aufbau und Gefüge der Gesteine wird in einer Kammer untersucht, die hydrostatische Drücke bis zu 2000 at zu erzeugen gestattet. Diese Kammer besteht aus einem dickwandigen Stahlzylinder von ca 150 mm Ø, 200 mm Länge und einer Innenbohrung von 40 mm Ø, der von unten mit einer Bodenschraube verschlossen ist, die zwei elektrische Durchführungen enthält. Von oben wird die ölfüllte Kammer mit einem Druckstempel (Bridgman-Druckpflanz) verschlossen. Der Druck auf den Stempel wird mit einer hydraulischen Presse (2000 Mp) erzeugt. Innendruck der Kammer wird unter Vernachlässigung der Reibungsverluste aus Gesamtkraft/Stempelfläche berechnet.

Die Ultraschallanlage besteht aus einem Seriengerät zur Ermittlung von Fehlern in Kabeln und Postleitungen, dem sog. Fehlerortungsgerät *FOG 101* vom Funkwerk Dresden, das durch einen zugehörigen Serienvorverstärker ergänzt wurde. Das Gerät gestattet eine Zeitauflösung von 10^{-8} sec, so dass mit Bariumtitanatgebern von 4 MHz Proben von 200 mm Länge und 27 mm \varnothing gemessen werden können.

Eine zweite Kammer für quasihydrostatische Drücke bis 15 kbar besteht aus einem dickwandigen Hohlzylinder, in dem sich die Probe von 27 mm \varnothing fest eingepasst befindet und von oben und unten durch zwei Druckstempel zusammengepresst wird.

Die Ultraschallgeber von 2 MHz befinden sich in den Druckstempeln. Die Bewegung der Druckstempel wird mit induktiven Wegmessern und einer Trägerfrequenzapparatur bestimmt. Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit v_1 sind Korrekturen, wie Schall-Laufzeit im Druckstempel, Verkürzung der Probe durch Druck usw., zu berücksichtigen.

Die etwa 100 bisher untersuchten trockenen Proben verschiedenster Art (Sedimente, Eruptiva, metamorphe Gesteine) ergaben in Übereinstimmung mit anderen Autoren folgendes:

Gesteinsproben mit geringen Anfangsschallgeschwindigkeiten v_1 zeigen eine relativ grosse Zunahme der Schallgeschwindigkeit (ca. 10–100%) unter Druck sowie eine grosse Streubreite der Kurven. Hierbei handelt es sich meist um stark poröse Sedimente oder Gesteine mit ausgeprägten Rissen und Spalten.

Diese Feststellungen wurden besonders durch eine Darstellung von 37 Sandsteinproben und 10 Tonsteinproben bestätigt, bei denen die relative Änderung der Schallgeschwindigkeit v_1 bei 2000 at als Funktion der Anfangsschallgeschwindigkeit v_1 aufgetragen wurde. Hier konnte eine fast funktionelle Abhängigkeit festgestellt werden.

Gesteinsproben mit bereits höherer Anfangsschallgeschwindigkeit zeigen nur eine geringe Zunahme der Schallgeschwindigkeit unter Druck (meist nur einige Prozente) sowie eine geringe Streubreite der Kurven. Es sind meist dichte Eruptivgesteine ohne Hohlräume oder ausgeprägte Trennflächen.

Diese Ergebnisse bestätigen somit die von Volarovic und Mitarbeitern (1967) vorgenommenen Modellrechnungen, die eine starke Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeitsänderung unter Druck von vorhandenen Poren, Spalten und Mikrorissen ergaben.

Um weitere Feststellungen über den allgemeinen Mechanismus der Druckabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit machen zu können, ist eine Vergleichbarkeit der Schallgeschwindigkeits-Druck-Kurven notwendig. Um die gemessenen Kurven vergleichbar zu machen, wurde die relative Schallgeschwindigkeitsänderung (d. h. absoluter Betrag der Schallgeschwindigkeitszunahme bezogen auf die Anfangsschallgeschwindigkeit, angegeben in Prozent) bei 2000 at gleich 1 gesetzt, so dass alle Kurven gewissermassen auf 1 normiert wurden und untereinander verglichen werden können. Der Vergleich von etwa 50 beliebig ausgewählten Kurven ergab, dass die Form der Kurve stark variiert: Die Zunahme der Schallgeschwindigkeit verläuft in einem Bereich von fast linearer Zunahme bis 2000 at sowie bis zu einer raschen Zunahme bis 1000 at mit anschliessender ausserordentlich geringer Zunahme im anschliessenden Druckbereich bis 2000 at. Homogene Gesteine, wie z. B. Schluffstein, zeigen lineare Zunahme, grobkörnige, inhomogene Gesteine, wie z. B. Quarz-

porphyrit, ergeben eine starke Kurvenkrümmung im Anfangsbereich. Selbst der Vergleich mehrerer benachbarter Sandsteinproben aus einem Bohrkern ergab unterschiedliche Kurvenverläufe. Wie eingangs erwähnt, liegen in diesen niederen Druckbereichen die Ursachen der unterschiedlichen Schallgeschwindigkeitsänderungen im Aufbau und Gefüge der Gesteine. Um zu allgemeinen Schlussfolgerungen zu kommen, müssen infolge der Vielfältigkeit der natürlichen Gesteine statistisch grössere Mengen von Schallgeschwindigkeits-Druck-Kurven mit mineralogisch-petrographischen Ergebnissen verglichen werden. Die Verarbeitung von grösseren Kurvenzahlen ist aber nur möglich, wenn jede Kurve durch nur wenige Parameter, die die wichtigsten Eigenschaften der Druckvorganges enthalten, charakterisiert wird. Wie oben festgestellt, ist die Grösse der Schallgeschwindigkeitsänderung sowie die Art der Schallgeschwindigkeitsänderung (Kurvenkrümmung) am bedeutungsvollsten, da sich daraus die 4 möglichen Fälle einer Schallgeschwindigkeitsänderung ergeben:

- a) Grosse Zunahme, starke Krümmung im Anfangsbereich (häufiger Fall)
- b) Grosse Zunahme, linearer Anstieg (seltener Fall),
- c) Geringe Zunahme, starke Krümmung im Anfangsbereich (häufiger Fall),
- d) Geringe Zunahme, linearer Anstieg (häufiger Fall).

Zur Darstellung und Unterscheidung dieser 4 Fälle ist es notwendig, die Art der Schallgeschwindigkeitsänderung durch einen Parameter zu beschreiben. Mit gewissen Einschränkungen bezüglich der Genauigkeit der einzelnen Fälle kann dies durch den sog. „Halbwertsdruck“ $P(\Delta v_1 = 0,5)$ erfolgen, d. h. das ist derjenige Druckwert, bei dem die Hälfte der maximalen Schallgeschwindigkeitsänderung (in unserem Fall bei 2000 at) erreicht wird. Bei starker Kurvenkrümmung ist dieser Druckwert klein, bei linearem Anstieg gross.

Eine Darstellung „Halbwertsdruck $P(\Delta v_1 = 9,5)$ gegen Schallgeschwindigkeitsänderung Δv_1 “ gestattet es dann, jede Kurve durch einen einzelnen Punkt darzustellen. Grössere Mengen zusammenliegender Punkte charakterisieren so ähnliches Druckverhalten, und die Gesteinsproben können dann auf ähnliche mineralogisch-petrographische Eigenschaften untersucht und zusammengefasst werden. Eine derartige Zusammenstellung ist bisher an etwa 100 beliebigen Proben erfolgt; es ergab sich aber daraus die Notwendigkeit, die Proben nach systematischeren Gesichtspunkten auszuwählen, da für beliebig ausgewählte Proben die Zahl von 100 Stück zu gering ist.

LITERATUR

- Hughes, D. S., J. H. Cross: Elastic wave velocities in rocks at high pressures and temperatures Geophysics, 16, (4), 577–593, 1951.
- Hughes, D. S., C. Maurette: Variation of elastic wave velocities in granites with pressure and temperature Geophysics, 21, (2), 277–284, 1956.
- Hughes, D. S., C. Maurette: Variation of elastic wave velocities in basic igneous rocks with pressure and temperature Geophysics, 22, (1), 23–31, 1957.
- Volarovič, M. P. u. a. im Sammelband: Fiziceszkije szvoisztva gornih porod pri vizsokih davlenijah, AN SSSR Trudi Insztituta fiziki Zemli 23 (190) 1962.
- Volarovič, M. P. u. a. im Sammelband: Elektriceszkije i mehaniceszkije szvoiszta gornih porod pri vizsokih davlenijah AN SSSR Trud Insztituta fiz. Zemli 37 (204), 1960.
- Volarovič, M. P., I. S. Tomasevškaja, Z. J. Stachovskaja: Die Untersuchung der Bruchvorgänge und der Geschwindigkeit elastischer Wellen Bericht über das 8. Ländertreffen des internationalen Büros für Gebirgsmechanik Akademieverlag Berlin 1967.